

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 20 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04321

研究課題名(和文)高温超電導線材の機械的ひずみ効果の評価法とコイル化技術に関する基礎研究

研究課題名(英文) Basic research on evaluation method of mechanical strain effect and coiling technology of high-temperature superconducting wires

研究代表者

野村 新一 (Nomura, Shinichi)

明治大学・理工学部・専任准教授

研究者番号：90401520

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：イットリウム系高温超電導線材は、高磁場超電導コイルの開発を可能にする超電導線材として期待されている。しかし、機械的ひずみにより臨界電流値(超電導状態を維持できる最大電流値)が大幅に低下するため、超電導コイルを製作する際に余分な巻線張力や曲げひずみが印加されないように工夫が必要である。本研究は、3次元的に複雑な形状を有し、テープ形状の高温超電導線材に引張や曲げなど複合的なひずみが印加され、製作が難しいと予想されるヘリカルコイル(ドーナツ型の巻枠に超電導線をらせん状に巻くコイル)の開発に挑戦し、線材短尺試料試験、巻線機開発、コイル通電試験を通じて、臨界電流特性を劣化させないコイル製作技術を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

イットリウム系高温超電導線材を用いた超電導コイルは、コイルを製作し通電した際に予期せぬ劣化が発生することが報告されている。本研究では、コイル形状とその製作技術を想定して短尺試料試験を行い、引張や曲げなど複合的な機械的ひずみが同時に印加された場合のひずみと臨界電流特性の評価手法を示し、この評価手法に基づき超電導コイルを製作した場合、臨界電流特性を劣化させない可能性を示唆する結果が得られた。超電導線材に強磁場や電磁力が印加された場合の評価手法を確立させる研究課題は残るが、将来的に電力応用や医療応用など高温超電導コイルの信頼性向上に寄与するコイル製作技術を提示する研究成果が得られたものと考えている。

研究成果の概要(英文)：YBCO high-temperature superconducting wires are expected as superconducting wires that enable the development of high-field superconducting coils. However, because the critical current (the maximum current that can maintain the superconducting state) is drastically reduced by mechanical strain, special considerations for the coiling technology are required to prevent from a decrease in the critical current due to extra winding tension and bending strain. This study challenged to develop a helical coil which has a three-dimensionally complex shaped winding. It is considered difficult to fabricate a helical coil using YBCO tape-shaped wires because complex strains such as tension and bending are simultaneously applied to the YBCO wires. From the results of short sample tests, a winding machine development and coil excitation tests, this study showed technical solutions for the winding method of a high-temperature superconducting helical coil without a decrease in the critical current.

研究分野：超電導工学，電力工学

キーワード：高温超電導線材 超電導コイル ヘリカルコイル 巻線技術 機械的ひずみ 臨界電流特性

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

イットリウム系（Y系）高温超電導線材は、超電導の電力応用ならびに 10 T を超える高磁場超電導コイルの開発を可能にする超電導線材として期待されている。しかし、Y 線材は機械的ひずみによって臨界電流値（超電導状態を維持できる最大電流値）が大幅に低下し、高磁場発生時における強大な電磁力の問題だけでなく、コイル巻線時においても余分な巻線張力や曲げひずみが印加されないように工夫が必要である。本研究で着目する学術的背景は下記 2 点である。

- (1) 一般に Y 系線材の短尺試料を用いた試験は数多くされているが、いずれも引張、曲げ、振れそれぞれ単独に機械的ひずみを与えた場合の臨界電流値の特性評価であり、実際のコイル形状とその製作技術を想定して引張や曲げ、振れなど複合的な機械的ひずみが同時に印加された場合の特性試験はなされていない。単独的なひずみによる臨界電流特性と複合的なひずみによる臨界電流特性との間にどのような関係があるのかも明らかになっていない。加えて機械的ひずみが印加された状態で外部磁場が Y 系線材に加わった場合に臨界電流特性がどのような挙動を示すのかも明らかでない。
- (2) 一般に超電導コイル開発において装置ごとに超電導線材の短尺試料試験を行い超電導コイルの設計および製作している。同じ形状の超電導コイルであっても装置規模が変わればその都度以前と同じ開発プロセスをたどりスケールアップが確立されていない。ましてやコイル形状や用途が変わった場合、超電導コイル化技術全般という広い視点で見たときの統一理論は無く、それぞれが事例にすぎない。特に Y 系線材の場合、短尺試料試験結果とコイル形状にした場合の関係性、さらにはコイルを通電して電磁力が発生する場合の臨界電流値の挙動など、工学的視点から見たときのコイル化技術全般に関する指針や統一理論が確立していない。

2. 研究の目的

本研究は、「Y 系高磁場超電導線材のコイル化技術の工学的理論を確立する」ことを研究目的とする。本研究では実際のコイル形状とその製作技術を想定して短尺試料試験を行い、超電導コイルレベルでの機械的ひずみの許容値を決定する評価手法を確立し、その妥当性について実験コイルを開発して実証する。また、臨界電流特性の評価関数として、従来の温度と磁場に機械的ひずみを新たな変数として加え、超電導コイルの軌道を入力することで超電導コイルの臨界電流特性が予測できる評価システムを構築することを最終目標とする。なお、本研究では Y 系テープ線材単線を用いた場合に焦点を絞り研究する。

3. 研究の方法

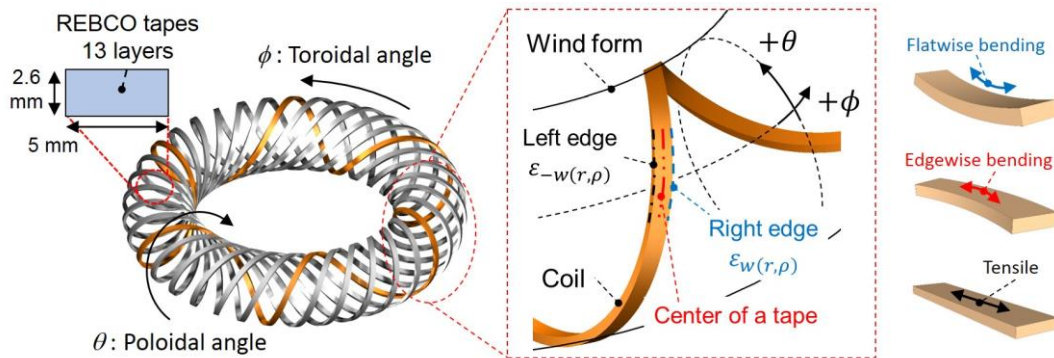


図 1 研究対象の 1 T 級電磁力平衡コイル（ヘリカルコイル）概観

Y 系線材は、希土類系の Y を他の元素に組成を変えて線材化されることから、これらを総称して REBCO 線材とも称される。本研究では、ガドリニウム（Gd）系の市販の高温超電導線材を用いて研究を進めたため、本報告ではこれ以降、REBCO 線材と記載する。

本研究では、図 1 に示すように、テープ形状の REBCO 線材に巻線張力、厚み方向（フラットワイズ）と幅方向（エッジワイズ）曲げ、さらに振れが複合的に印加される最も製作困難であり 3 次元的な複雑な形状を有するヘリカルコイルを研究対象とした。図 1 のヘリカルコイルは、電磁力平衡コイル（FBC）と称し、超電導コイルに発生する電磁力を大幅に低減させるようにヘリカル巻数を最適化したコイルである。本研究では、0.2 mm 厚、5 mm 幅、77 K での臨界電流値 285 A（平均）の REBCO 線材を使用し、外直径 0.3 m の 1 T 級電磁力平衡コイル開発を通じ、

- (1) REBCO 線材の短尺試料試験結果に基づき、引張と曲げが複合的に印加される状態でのひずみと臨界電流特性の関係を示す評価関数の構築
- (2) ヘリカルコイル軌道によって REBCO 線材に複合的に印加される機械的ひずみを概算し、上記 (1) で得られた評価関数に基づき臨界電流特性を予測する手法の検討
- (3) REBCO 線材の臨界電流特性を劣化させないヘリカルコイル用巻線機の開発ならびに巻線張力の許容値の評価

(4) 上記 (3) で開発した巻線機を用いたヘリカルコイルの試験巻線ならびに液体窒素冷却による通電特性の評価
 の 4 段階で研究を遂行した。なお、本研究で開発した電磁力平衡コイルは、液体ヘリウム冷却 (4.2 K) の場合、1000 A で 1 T 発生する設計となっている。

4. 研究成果

(1) REBCO 線材の複合的ひずみに対する臨界電流特性の評価関数の構築

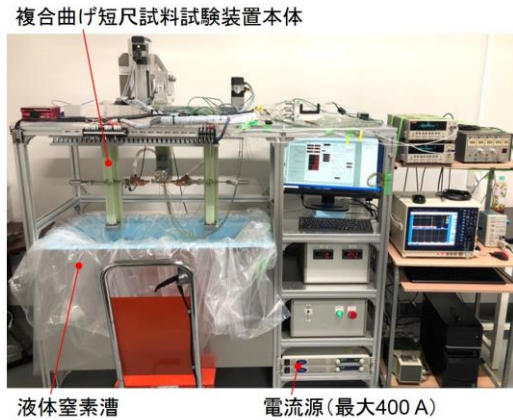


図 2 REBCO 線材複合曲げ試験装置写真

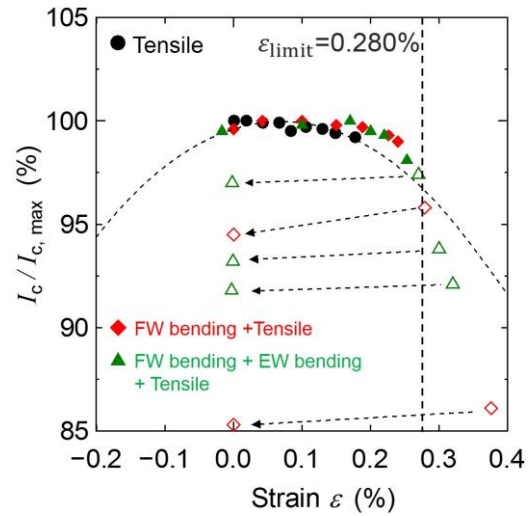


図 3 REBCO 線材複合曲げ臨界電流特性

図 2 は REBCO 線材の短尺試料に引張、曲げなどの機械的ひずみを同時に印加し、液体窒素冷却によって臨界電流特性を評価できる装置写真である。本研究で使用した REBCO 線材の機械的ひずみに対する臨界電流特性を図 3 に示す。縦軸は機械的ひずみが印加される前の臨界電流値で規格化している。短尺試料には、張力のみ、引張+厚み方向曲げ (フラットワイズ曲げ)、引張+厚み方向曲げ (フラットワイズ曲げ) + 幅方向曲げ (エッジワイズ曲げ) の 3 つの状態の機械的ひずみを複合的に印加している。本研究では、引張、曲げなど複合的に印加される機械的ひずみを線材長手方向の 1 軸ひずみとして評価し、臨界電流特性と 1 軸ひずみに関する評価関数 (図 3 の破線) を示した。

図 3 の結果から、機械的ひずみを除去しても臨界電流値が元に戻らない不可逆的なひずみの限界値は 0.280% であることがわかった。つまり、このひずみの値が REBCO 線材を用いた超電導コイルを開発する上で許容される機械的ひずみの限界値となる。さらに、上記、3 つの状態による複合的なひずみが印加された状態でも、REBCO 線材の臨界電流特性は線材長手方向の 1 軸ひずみで評価できることを示している。つまり、超電導コイルの臨界電流値は、長手方向の 1 軸ひずみで評価すれば、超電導コイルの大きさ、形状が変わってもスケールリング則が適用できる可能性があることを示唆している。

(2) コイル軌道による複合的ひずみ概算と評価関数に基づく臨界電流特性予測

図 1 に示した電磁力平衡コイルの軌道によって REBCO 線材に印加されるフラットワイズと

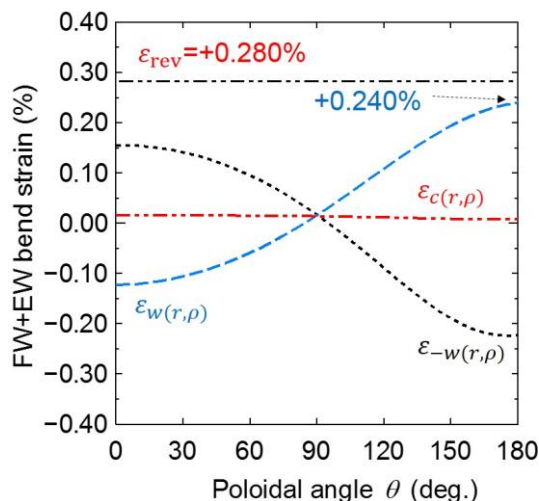


図 4 電磁力平衡コイル軌道による REBCO 線材に印加される複合的ひずみ分布

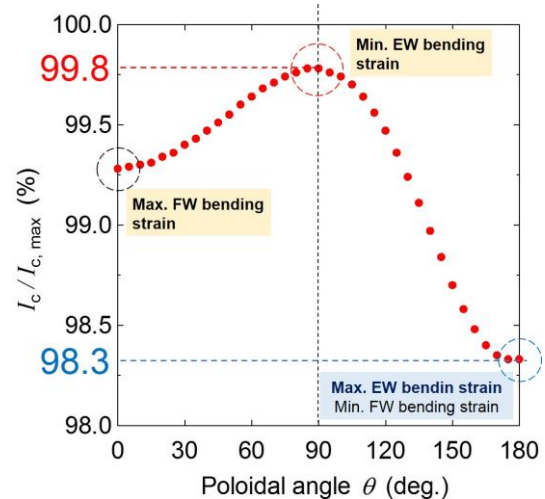


図 5 評価関数に基づく電磁力平衡コイルの臨界電流特性の予測値

エッジワイズの曲げひずみを図4に示す。なお、開発した電磁力平衡コイルは、REBCO線材に印加されるエッジワイズ曲げを最小限にするため、トーラス上の最短経路を通る測地線軌道となっている。図4より、コイル軌道によってREBCO線材に印加される最大曲げひずみは0.240%である。短尺試料試験結果より臨界電流値を低下させない限界ひずみは0.280%であることから、コイル製作時の巻線張力および通電時の電磁力によって発生するひずみは合わせて0.040%以内に抑制する必要があることがわかる。短尺試料試験結果から得られた評価関数より、電磁力平衡コイルの臨界電流特性は図5のように評価され、REBCO線材の臨界電流値285A(平均)に対して、最低でも98.3%の臨界電流値は得られることが予測される。

(3) ヘリカル巻線機開発

REBCO線材による電磁力平衡コイルの製作可能性を検討するために、図6に示すようなヘリカル巻線機を独自に開発した。電磁力平衡コイルの巻枠はGFRP(ガラス繊維強化プラスチック)製である。巻線機の基本仕様、設計、制御回路、部品の製作および組立・調整作業は、本研究に従事する博士後期課程の学生自身ですべて行っている。この巻線機はテープ形状のREBCO線材に余分な機械的ひずみを印加させないように、REBCO線材ボビンが電磁力平衡コイル軌道に合わせて、旋回(ϕ 方向)、回転(α 方向)、首振り(β 方向)、傾き(γ 方向)の4軸同時制御される仕様となっている。REBCO線材ボビンの4軸の動きを図7にまとめる。

(4) 巻線機を用いた電磁力平衡コイルの試験巻線ならびに液体窒素冷却による通電特性評価

図6に示した巻線機を用いて電磁力平衡コイルの試験巻線作業を実施した。図1に示した1T級電磁力平衡コイルは、巻数6ターンのヘリカルコイルが6組直列接続される。各ヘリカルコイルはREBCO線材を13層巻く設計となっているが、試験巻線ではそのうち1層分の巻線を実施した。REBCO線材の短尺試料試験結果と電磁力平衡コイルの軌道の関係から、巻線張力と通電時の電磁力によって発生する機械的ひずみは0.040%以内に抑制する必要がある。そのため試験巻線では巻線張力を4Nに抑えて実施した。図8にREBCO線材を用いた巻線作業の様子を示す。なお、REBCO線材の短尺試料試験では、金属基板(ハステロイ側)に引張応力が印加されるようにフラットワイズ方向に曲げている。一方、電磁力平衡コイルの試験巻線では、安定化層(銅)に引張応力が印加されるようにフラットワイズ方向に曲げている。これは、REBCO線材の銅側に臨界電流特性を評価するための電圧タップをはんだづけしているからである。

図9に液体窒素冷却による電磁力平衡コイル通電試験の様子を示す。図9に示すように銅電極を介して直列接続したAからFの各ヘリカルコイルの両端に電圧タップを接続し臨界電流特性を評価した。11回目の

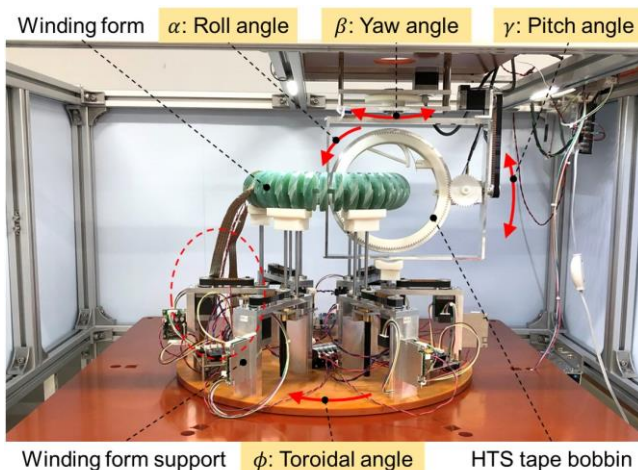


図6 REBCO線材対応ヘリカル巻線機写真

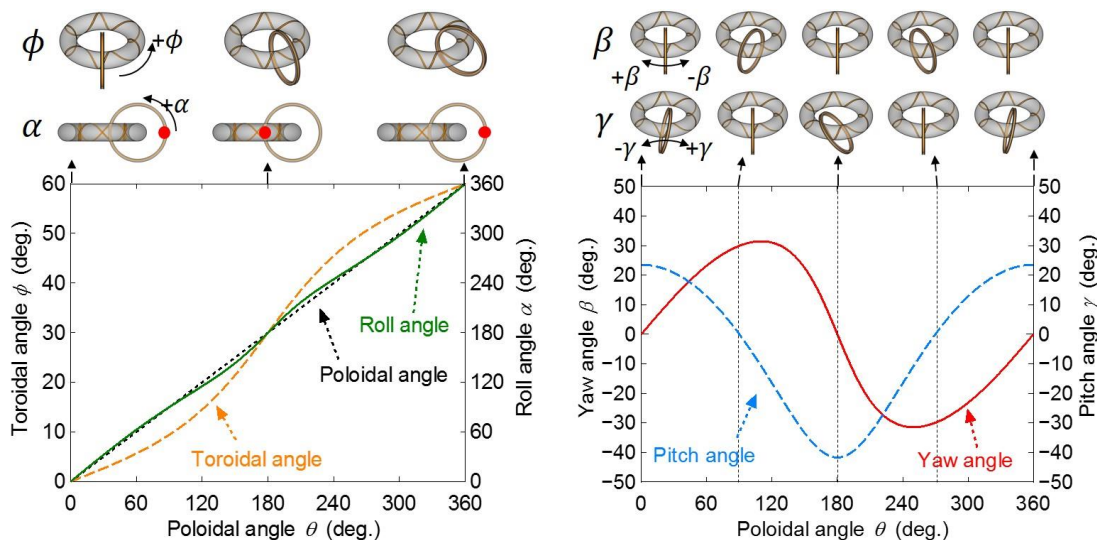


図7 REBCO線材ボビンの電磁力平衡コイル軌道に応じた動き

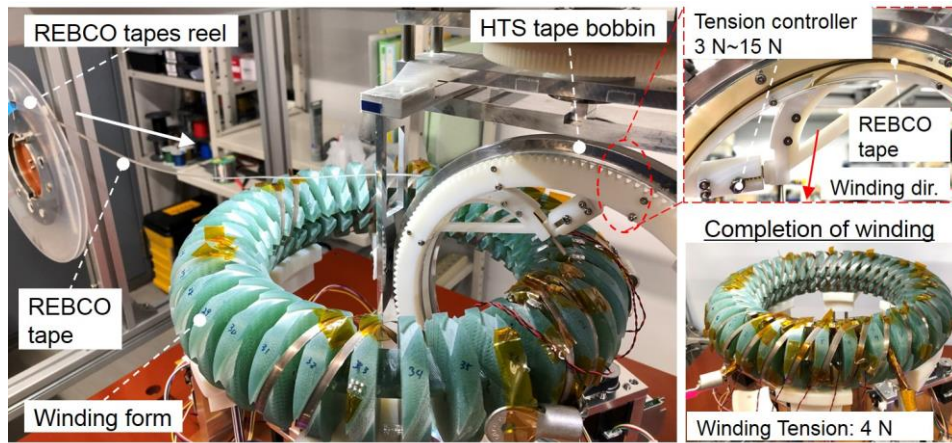


図 8 巻線機を用いた電磁力平衡コイル試験巻線作業の様子

通電試験では、通電電流 285 A で 6 組のうち 1 組のコイルの銅電極付近で REBCO 線材が焼損・破断した。これは、銅電極と REBCO 線材の接続抵抗の大きさによって発生したものと予測される。その後、破断部分を修正し、累計 45 回の通電試験を行った。図 10 に 25 回目および 45 回目の通電特性を示す。臨界電流値を定める電界基準を $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ に定めている。累計 45 回の通電試験の結果、すべてのコイルで 285 A 近傍までの通電に成功し、繰り返し通電試験による REBCO 線材の劣化は確認されなかった。

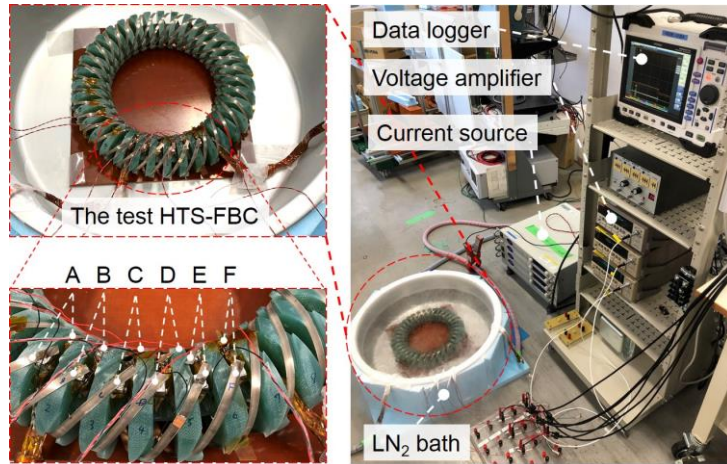


図 9 液体窒素冷却による電磁力平衡コイル通電試験の様子

(5) 研究の総括

液体窒素冷却による電磁力平衡コイルの通電試験結果より REBCO 線材の臨界電流特性に劣化は確認されなかった。この結果は、1) REBCO 線材に引張、曲げ(フラットワイズ, エッジワイズ)の複合的なひずみが印加された状態でも、線材長手方向の 1 軸ひずみで臨界電流特性を評価する。2) コイル軌道からひずみを概算し短尺試料試験結果に基づき巻線張力の許容値を設定してコイル製作を行う。3) その結果、臨界電流特性を劣化させずに 3 次的に複雑なコイル軌道を有するヘリカルコイルでも REBCO 線材を用いたコイル開発が可能である。という一連の本研究のコイル化技術手法の妥当性を実証した結果であるといえる。

今後、1 T 級電磁力平衡コイルを完成させ液体窒素冷却ならびに液体ヘリウム冷却による通電試験を実施し、研究開始当初の背景ならびに目的に示した REBCO 線材に強磁場ならびに電磁力が印加された際の評価手法を確立させる研究課題は残ってしまっているが、上記の研究成果より「REBCO 線材の高磁場高温超電導線材のコイル化技術の工学的理論を確立する」という研究目的は最低限達成できたものと評価している。

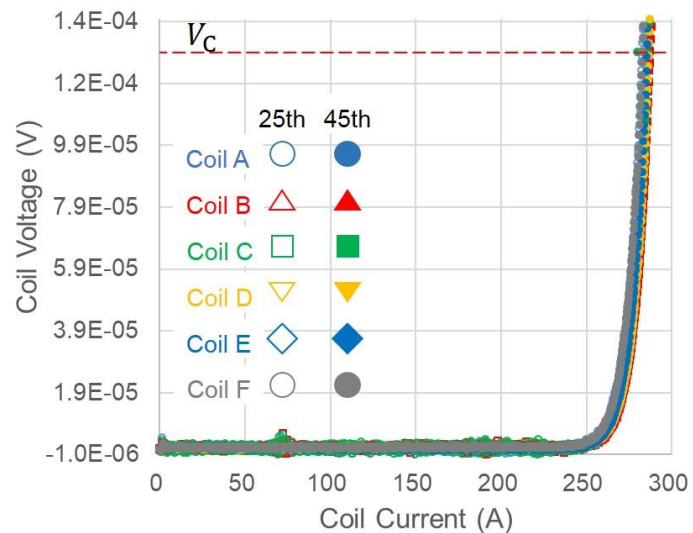


図 10 REBCO 線材を用いた電磁力平衡コイルの通電特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kamada Hiroharu, Ninomiya Akira, Nomura Shinichi, Yagai Tsuyoshi, Nakamura Taketsune, Chikaraiishi Hiroataka	4. 巻 30
2. 論文標題 Development of 1-T Class Force-Balanced Helical Coils Using REBCO Tapes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2020.2971461	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yagai Tsuyoshi, Akai Haruka, Ryun R. Dong, Kamada Hiroharu, Nomura Shinichi, Tsutsui Hiroaki, Nakamura Taketsune, Chikaraiishi Hiroataka, Yanagi Nagato, Imagawa Shinsaku	4. 巻 27
2. 論文標題 Experimental Investigation of Complex Bending-Effect on Superconducting Characteristic of YBCO Tape Applied to Force-Balanced-Coil for Superconducting Magnetic Energy Storage Device	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2017.2654422	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件／うち国際学会 8件）

1. 発表者名 鎌田太陽, 二ノ宮晃, 野村新一, 谷貝剛, 中村武恒, 力石浩孝
2. 発表標題 1 T級高温超電導電磁力平衡ヘリカルコイルの開発 - 複合ひずみ効果に基づいたヘリカル巻線張力の検証 -
3. 学会等名 2019年度春季第98回低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Kamada, A. Ninomiya, S. Nomura, T. Yagai, T. Nakamura, H. Chikaraiishi
2. 発表標題 Development of a 1-T Class Force-Balanced Helical Coils Using REBCO Tapes (発表論文は査読審査を受けてIEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 30, no. 4, Jun. 2020に掲載済)
3. 学会等名 International Conference on Magnet Technology (MT 26) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Kamada, A. Ninomiya, S. Nomura, T. Yagai, T. Nakamura, H. Chikaraisi (H. Kamada氏は"Outstanding Poster Presentation Award of 10th ACASC - 2nd Asian ICMC - CSSJ"を受賞)
2. 発表標題 Critical Current Properties of Force-Balanced Helical Coils Using REBCO Tapes Cooled in Liquid Nitrogen
3. 学会等名 10th ACASC / 2nd Asian-ICMC / CSSJ Joint Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鎌田 太陽, 植木 徹, 二ノ宮 晃, 野村 新一, 谷貝 剛, 中村 武恒, 力石 浩孝
2. 発表標題 高温超電導コイルの巻線ひずみに対する臨界電流特性の外部磁場依存性に関する実験研究
3. 学会等名 2018年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鎌田 太陽, 二ノ宮 晃, 野村 新一, 谷貝 剛, 中村 武恒, 力石 浩孝
2. 発表標題 1 T級高温超電導電磁力平衡ヘリカルコイルの開発 線材長手方向ひずみ分布に対する臨界電流評価
3. 学会等名 2018年度秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鎌田太陽, 二ノ宮 晃, 野村新一, 谷貝 剛, 中村武恒, 力石浩孝
2. 発表標題 1 T級高温超電導電磁力平衡ヘリカルコイルの開発 電流負荷特性と複合曲げひずみ効果
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Kamada, T. Ueki, A. Ninomiya, S. Nomura, T. Yagai, T. Nakamura, H. Chikaraishi
2 . 発表標題 Test winding of a 1-T class force-balanced coils using high temperature superconducting tapes
3 . 学会等名 25th International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 T. Ueki, H. Kamada, A. Ninomiya, S. Nomura, T. Yagai, T. Nakamura, H. Chikaraishi
2 . 発表標題 Experimental study on the mechanical stress effect on the degradation of high temperature superconducting coils
3 . 学会等名 25th International Conferene on Magnet Technology (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 T. Yaga, H. Akai, R. Dong Ryun, H. Kamada, S. Nomura, H. Tsutsui, T. Nakamura, H. Chikaraishi, N. Yanagi, S. Imagawa
2 . 発表標題 Experimental Investigation of Complex Bending-Effect on Superconducting Characteristic of YBCO Tape Applied to Force-Balanced-Coil for Superconducting Magnetic Energy Storage Device (発表論文は査読審査を受けてIEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 27, no. 4, Jun. 2017に掲載済)
3 . 学会等名 2016 Applied Superconductivity Conference (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 H. Kamada, S. Goya, A. Ninomiya, S. Nomura, T. Yagai, T. Nakamura, H. Tsutsui, H. Chikaraishi, N. Yanagi, S. Imagawa
2 . 発表標題 Evaluation of mechanical stresses in high-temperature superconducting during the helical winding process
3 . 学会等名 2016 Applied Superconductivity Conference (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1. 発表者名 H. Akai, T. Yagai, D. R. Lee, H. Kamada, S. Nomura, H. Tsutsui, T. Nakamura, H. Chikaraishi, N. Yanagi, S. Imagawa (H. Akai氏は"Asian ICMC Outstanding Poster Presentation Award"を受賞)
2. 発表標題 Experimental investigation of strain distribution of YBCO under complex bending situations and its effect on superconducting property
3. 学会等名 1st Asian ICMC and CSSJ 50th Anniversary Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 H. Kamada, A. Ninomiya, S. Nomura, T. Yagai, T. Nakamura, H. Tsutsui, H. Chikaraishi, N. Yanagi, S. Imagawa
2. 発表標題 Critical current properties of the force-balanced helical coil with a complex stress distributions using high temperature superconducting tapes
3. 学会等名 1st Asian ICMC and CSSJ 50th Anniversary Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中村 武恒 (Nakamura Taketsune) (30303861)	京都大学・工学研究科・特定教授 (14301)	
研究分担者	谷貝 剛 (Yagai Tsuyoshi) (60361127)	上智大学・理工学部・教授 (32621)	
連携研究者	力石 浩孝 (Chikaraishi Hirotaka) (60249969)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授 (63902)	